第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

羌塘高原申扎高寒湿地辐射平衡和地表反照率特征

强耀辉[1,2]， 王坤鑫[1,2]， 马 宁[3]， 张寅生[1,4]， 郭燕红[1]

（1. 中国科学院青藏高原研究所，北京 100101；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国科学院地理科学与资源研究所，陆地水循环及地表过程重点实验室，北京 100101；4. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心，中国科学院-巴基斯坦高等教育委员会，巴基斯坦 伊斯兰堡 45320）

摘 要：羌塘高原湿地能量交换过程及其作用结果对气候有着重要影响。本研究选择羌塘高原申扎地区典型高寒湿地的辐射平衡观测数据为基础，分析了2018-07—2020-07逐日、逐月、逐时、不同季节典型天气辐射各分量及逐日反照率变化特征。日尺度上，辐射各分量均表现出明显的季节规律，呈"U"型变化。6月向下短波辐射全年最大为301.1 $W\cdot m^{-2}$，平均温度最高，向上长波辐射也达到最大，为371.5 $W\cdot m^{-2}$，1月则相反。季节尺度上，短波辐射各季节平均值春季>夏季>秋季>冬季，长波辐射和净辐射则夏季最高，冬季最小。不同天气下，各季节晴天辐射通量较平滑，多云和降水天气变化不规则。地表反照率2018—2020年观测均值为0.23，夏、秋季小，冬、春季大，降雪天气甚至达到了0.63。研究结果可对揭示羌塘高原典型高寒湿地辐射收支的动态变化规律、阐明羌塘高原热力作用对其自身及周边地区的影响提供数据支撑。

关键词：申扎湿地；辐射变化；典型天气；反照率

青藏高原是世界海拔最高的地区，平均海拔超过4000 m，被誉为地球"第三极"，幅员辽阔，太阳辐射强烈，昼夜温差大，其地气能量交换过程及其作用结果不仅对青藏高原及其临近地区有着重要影响，而且对我国乃至全球气候也造成了重要影响[1-2]。而地气能量交换的主要动力为太阳辐射，因此充分了解其辐射平衡特征及其变化规律尤为重要。为此国内外科学家在青藏高原开展了多项关于辐射平衡的科学考察试验。如1979年发起的第一次青藏高原气象科学考察试验（QZPMEX）、1998年第二次青藏高原气象科学考察试验（TIPEX）[3]、1996—2000年中日合作"全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验"（GAME-Tibet）[4]、青藏高原地气相互作用平台[5]、第三次大气科学实验[6]，"第三极环境"（TPE）国际计划[7]，第二次青藏高原综合科学考察[8]等。青藏高原不同下垫面与气候环境下太阳辐射的能量传输规律有着很大不同[9-17]，而青藏高原湿地约占中国湿地总面积的三分之一，由于高寒气候特征的影响，其生态系统更加脆弱，对气候变化带来的影响也更加敏感[18]。近几十年来，在整体气候"暖湿化"背景下，高寒湿地总体上却呈现退化趋势[19]。刘志伟等[20]研究表明近30 a来气温升高，导致地表蒸发量增大是青藏高原湿地变化的主要驱动力，而气温升高的主要动力为向下长波辐射对空气进行加热，故厘清青藏高原湿地的太阳辐射能量收支特征对揭示其变化有着重要意义。

近年来青藏高原高寒湿地辐射收支已成为研究热点，刘安花等[11]利用2004年观测资料对海北站高寒湿地长波、短波辐射研究发现其季节变化明显，受下垫面影响较大；何慧根等[12]、张海宏等[13]分别研究了藏北高原湿地和长江源区高寒湿地辐射变化特征；殷代英等[14]则对敦煌湖泊湿地地表辐射平衡变化特征研究分析发现不同天气背景下，辐射四分量及净辐射的日平均变化过程差异较大；张乐乐等[15]在青海湖流域瓦彦山湿地研究了辐射平衡和地表反照率变化特征发现总辐射与净辐射最大

收稿日期：2020-12-10； **修订日期：**2021-03-17
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201）；中国科学院战略先导A专项（XDA20060201）；国家重点研发项目（2017YFA0603101）；国家自然科学基金青年项目（41801051）
作者简介：强耀辉（1995-），男，硕士研究生，主要从事寒区水文气象研究. E-mail: qiangyh18@itpcas.ac.cn
通讯作者：张寅生. E-mail: yszhang@itpcas.ac.cn

为7月，最小则为2月；谢琰等[16]通过对黄河源区高寒湿地辐射平衡分析发现该区域为强热源。但目前的研究多集中在青藏高原东北边缘地区，对青藏高原中西部特别是羌塘高原的湿地辐射认识不足。故本文依托安装在申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站(以下简称申扎站)[21]的波文比观测系统的辐射观测资料，分析了申扎湿地2018-07—2020-07的辐射变化特征，对理解羌塘高原高寒湿地地气相互作用以及湿地变化有重要的科学意义。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站(88°42′E，30°57′N)处于色林错流域西南部，是色林错流域唯一的气象站[20]，湿地发育良好，海拔4700 m，年均温0.4 ℃，年降水量约298.6 mm，年平均风速3.8 m·s^{-1}，为高原亚寒带干旱季风性气候[22]，本研究所使用的观测设备位于羌塘高原申扎站内(图1)，数据主要通过波文比系统上安装的辐射四分量(CNR4)观测仪器获取，安装高度0.9 m。数据采集器CR1000，采样频率10 Hz，输出30 min数据，主要包括向下、向上短波辐射，向下、向上长波辐射。波文比仪器周围下垫面植被覆盖良好，水源充足(图1)。

1.2 研究方法

本文选取2018-07—2020-07的辐射数据分析羌塘高原典型高寒湿地的辐射平衡和地表反照率特征，为确保分析结果的准确性，将夜间向下、向上短波辐射数据均设置为0，剔除了各辐射分量中小于0和明显异常的数据，利用线性插值进行插补。逐日辐射通量为当日所有30 min数据平均值；逐月辐射通量为所有相同月份30 min数据平均值；季节划分分别设置各年份3—5月、6—8月、9—11月、12月至次年2月为春季、夏季、秋季、冬季，通过计算各季节30 min数据平均值得到逐小时变化结果；年辐射通量通过计算各分量所有30 min观测数据均值得到。由于太阳高度角及早晚时分大气对太阳光中可见光波段削弱较大，近红外波段辐射所占比重较大[23]，同时考虑到观测仪器采用北京时间，与当地时间有所不同，为克服上述影响，本文利用北京时间12:00—16:00的向下和向上短波辐射观测数据来计算其逐日反照率。

2 结果与分析

2.1 辐射通量年变化特征

2.1.1 辐射通量逐月均值变化 由2018-07—2020-07辐射各分量和反照率的逐月变化特征可知(表1)，向下短波辐射6月最大，为301.1 W·m^{-2}，而最小值则出现在1月，为154.0 W·m^{-2}。申扎地区受到云、雨等影响较大，因此，虽然7月太阳高度角更高，但其向下短波辐射数值与8—9月非常接近。1月向上短波辐射最小，为45.0 W·m^{-2}，向下短波辐射也最小，为154.0 W·m^{-2}。由于申扎湿地冬季季节性

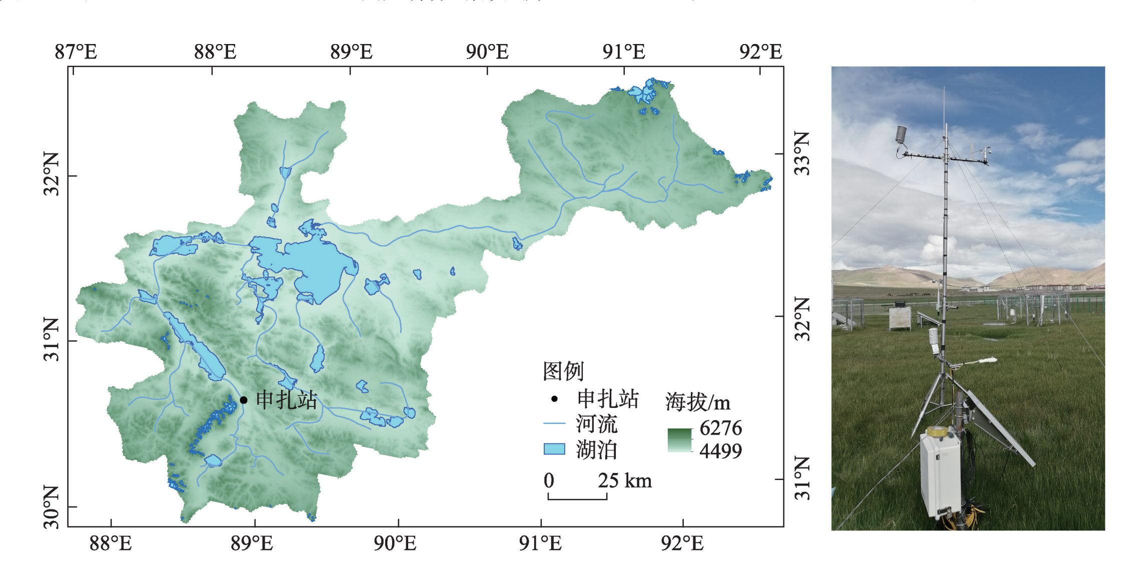


图1 观测站地理位置和观测仪器

Fig. 1 Location map of Xainza and the measurement site

表1　2018-07—2020-07申扎站辐射各分量逐月平均变化

Tab. 1　Monthly mean of radiation components of Xainza site from June 2018 to June 2020

辐射分项	月份											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
向下短波辐射/(W·m^{-2})	154.0	187.2	238.9	267.0	294.7	301.1	238.9	235.3	236.5	222.8	185.5	160.9
向上短波辐射/(W·m^{-2})	45.0	52.7	67.1	68.6	72.2	67.2	47.2	45.3	49.2	51.6	50.4	49.1
地表反照率	0.27	0.26	0.26	0.24	0.23	0.21	0.18	0.18	0.18	0.21	0.25	0.28
向上长波辐射/(W·m^{-2})	265.7	279.1	298.1	326.9	348.9	371.5	369.3	367.3	354.2	319.6	295.6	270.7
向下长波辐射/(W·m^{-2})	185.3	194.4	205.8	236.4	257.9	289.5	316.1	312.0	285.2	229.2	203.6	183.8
净辐射/(W·m^{-2})	28.7	49.9	79.4	107.9	131.5	151.8	138.6	134.6	118.3	80.8	43.1	24.9

积雪,冬季各月反照率最高,春、夏季节地表返青、地表水含量增加,则反照率减小,导致7—8月向上短波辐射仅高于1月。向上长波辐射最大出现在6月,为371.5 W·m^{-2},即申扎湿地各月平均地表温度最大出现在6月,最小值出现在1月,为265.7 W·m^{-2}。向下长波辐射则7月最大为316.1 W·m^{-2}。净辐射各月份均为正值,12月份最小为24.9 W·m^{-2},6月最大为151.8 W·m^{-2}。

2.1.2　辐射通量逐日均值变化　图2展示了2018-07—2020-07申扎湿地辐射四分量和净辐射的逐日变化特征。各分量均表现出明显的季节特征,呈“U”型变化,但变化幅度各有差异。向下短波辐射(DSR)变化幅度最大,向下(DLR)、向上长波辐射(ULR)次之,向上短波辐射(USR)变化幅度最小。

申扎站向下短波辐射在2019年6月14日达到最大,为403.3 W·m^{-2}。最小值则在2019年2月25日,为67.2 W·m^{-2}。此外图2a也反映出夏季短波向下振幅大于冬季。由于夏季申扎湿地阴雨天气较多,阻碍了太阳辐射到达地面,故在2019年7月前后,向下短波辐射出现了明显下降的变化特征。

向下短波辐射到达地面后,一部分直接被反射进入大气,即为向上短波辐射,申扎湿地该部分能量占比为24.4%,其主要受下垫面水分、降雪、植被覆盖等影响。图2b分析结果表明向上短波辐射整体变化幅度较小,但与向下短波辐射变化特征一致,观测期间平均值为55.4 W·m^{-2},但2019年3月27日等天气较为反常,达到了195.7 W·m^{-2},主要原因为当天发生了降雪事件,申扎湿地下垫面发生突变,反照率变大,导致向上短波辐射突然变大。

向下长波辐射即为大气逆辐射,大气对向下长波辐射的有效吸收是气温升高的主要原因。冬季申扎湿地云量少、水汽含量和气温都很低,向下长波辐射也为各季节最小,并在2019年的1月15日达到最小值142.5 W·m^{-2}(图2c)。夏季则因为水汽含量升高、云量增加以及气温升高等原因,向下长波辐射变大,并在2018年8月1日达到观测期间

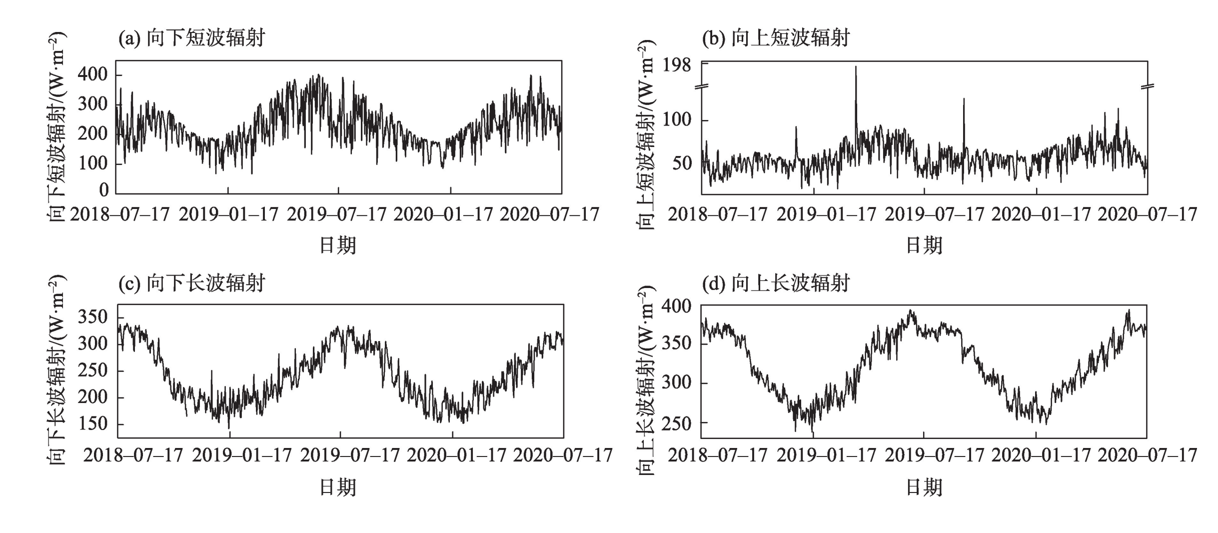


图2　2018-07—2020-07申扎湿地辐射各分量逐日变化

Fig. 2　Daily variations of the components of radiation in Xainza wetland from June 2018 to June 2020

最大值339.7 W·m⁻²。向下长波辐射平均值为241.9 W·m⁻²。

向上长波辐射大小由地表温度决定，而向下短波辐射对地表温度影响最大，因此，向上长波辐射呈现了与向下短波辐射同样的变化规律，但变化幅度小于后者(图2a，图2d)，观测期间最小值出现在2019年1月15日，为238.0 W·m⁻²，最大值则出现在2020年6月18日，为394.0 W·m⁻²。由于云雨天气等影响，向上长波辐射在2019年7月出现了类似于向下短波辐射的突降现象，使7月温度小于6月。

净辐射观测结果表明，全年地表净辐射观测值变化范围为-5.7~221.1 W·m⁻²(图3)。观测期间申扎湿地净辐射小于0的天数仅为3 d，其余时间均为正值。申扎湿地全年地表净辐射通量累计值占向下短波辐射40.1%，表明申扎湿地是其周边环境的热源。

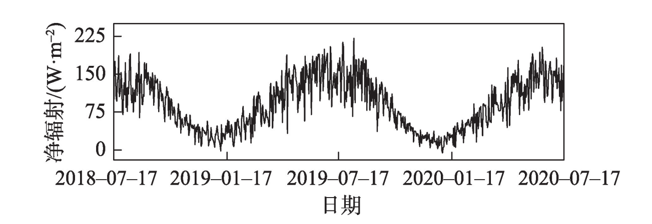


图3 2018-7—2020-7月申扎湿地净辐射逐日变化

Fig. 3 Daily variations of net radiation in Xainza wetland from June 2017 to June 2020

2.2 季节平均日变化特征

由申扎湿地不同季节辐射通量日内变化特征可知(图4)，不同季节向下短波辐射(DSR)变化特征相同，均为单峰型。春季和夏季在13:00分别达到了峰值821.8 W·m⁻²和774.6 W·m⁻²，秋季和冬季则在14:00达到了峰值，分别为743.0 W·m⁻²和620.0 W·m⁻²。向下短波辐射通量均值春季＞夏季＞秋季＞冬季，分别为266.8 W·m⁻²、257.4 W·m⁻²、215.2 W·m⁻²、166.9 W·m⁻²。春季向下短波辐射最大主要由于青藏高原夏季云量厚，降雨时间长，影响了地面接受太阳短波辐射的效率，由于太阳高度角变化，春、夏季接受太阳辐射平均13 h，秋季为12 h，冬季则为11 h。

向上短波辐射(USR)变化特征与向下短波辐射一致，但变化幅度明显变小，春季、夏季、秋季、冬季最大辐射值均出现在13:00，依次分别为200.6 W·m⁻²、142.0 W·m⁻²、152.1 W·m⁻²和166.2 W·m⁻²，春季向上短波辐射通量峰值最高，夏季峰值最小。各季

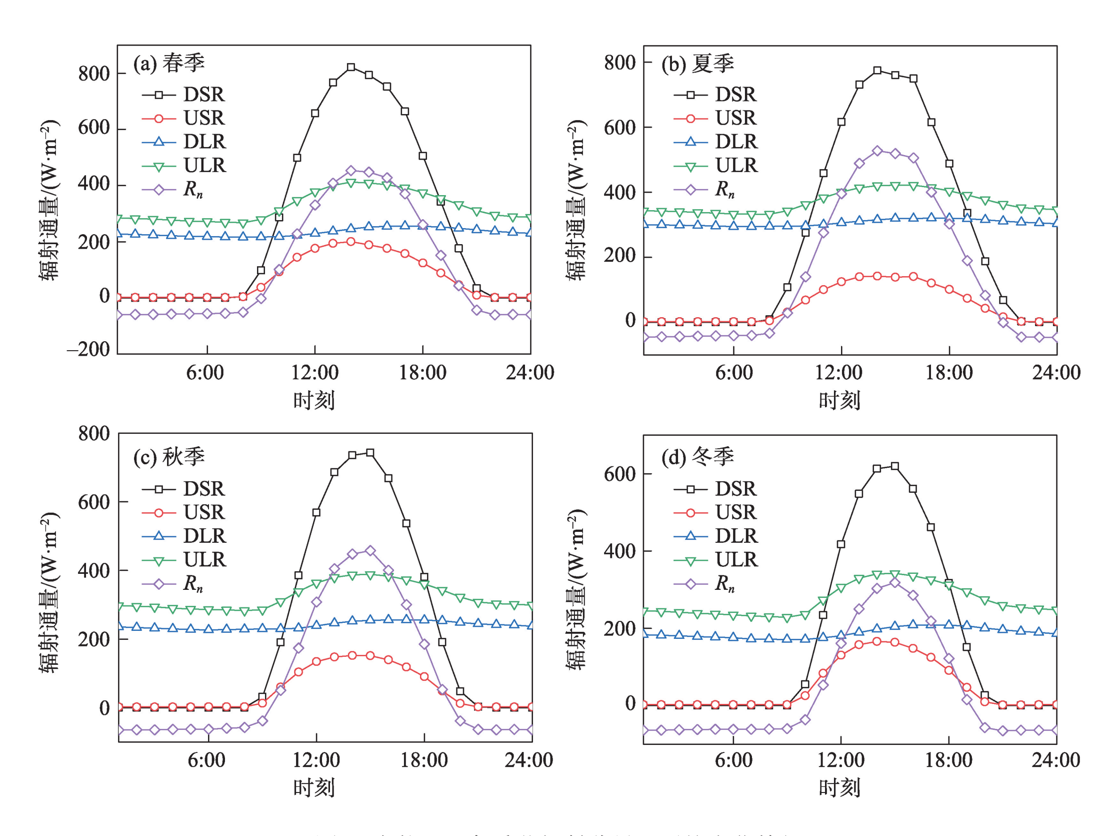


图4 申扎湿地各季节辐射分量日平均变化特征

Fig. 4 Diurnal variations of the components of radiation in four seasons in Xainza wetland

节向上短波辐射均值分别为69.3 W·m⁻²、52.7 W·m⁻²、50.1 W·m⁻²和48.8 W·m⁻²,反照率平均分别为0.25、0.20、0.23和0.30。

向下长波辐射(DLR)不同季节辐射通量大小差异明显,夏季辐射通量最大,春、秋季节次之,冬季最小。各季节峰值依次为255.8 W·m⁻²、318.9 W·m⁻²、255.5 W·m⁻²、208.4 W·m⁻²,各个季节最大值均出现在16:00,和向下短波辐射最大值相比有2~3 h的滞后。这一观测结果与藏东南站[24]、黄河源区[16]等青藏高原其他地区各季节辐射观测结果类似。各季节向下长波辐射最小值各季节则基本出现在日出前的时刻。

向上长波辐射(ULR)在白天变化明显,原因即为日落后到第2 d日出前地表温度较低,导致夜间向上长波辐射数值较小,且变化不明显。各季节最小值出现在日出前的时刻,分别为268.1 W·m⁻²、332.4 W·m⁻²、283.3 W·m⁻²、230.4 W·m⁻²。白天则由于短波向下辐射逐渐变大,地表温度升高,向上长波辐射也随之增加,各季节最大值分别为412.8 W·m⁻²、421.6 W·m⁻²、388.3 W·m⁻²、342.3 W·m⁻²,夏季最大,冬季最小,其中最大值出现时刻与向下短波辐射观测结果吻合。

净辐射(R_n)在各季节夜间均为负值,表明在夜间,能量不断以向上长波辐射的形式从申扎湿地地表传送到大气中形成一个冷源。各个季节净辐射最小值分别为-60.4 W·m⁻²、-45.7 W·m⁻²、-64.8 W·m⁻²、-64.1 W·m⁻²;白天净辐射则为正值,形成一个热源,不断接收向下短波辐射和向上长波辐射的能量,导致地表不断升温,各季节净辐射最大值分别达到了453.7 W·m⁻²、527.7 W·m⁻²、457.6 W·m⁻²、285.7 W·m⁻²。

2.3 典型天气背景下辐射分量日变化特征

为分析申扎湿地各季节不同天气背景下辐射变化特征,本文依据马宁等[25]、殷代英等[14]分别在巴丹吉林沙漠腹地和敦煌湖泊湿地的不同天气辐射特征的研究结果,在春季、夏季、秋季、冬季分别选择了晴、多云、降水天气进行分析,不同季节下天气晴朗时,辐射各分量变化均较为平滑,呈"U"型,即标准的辐射平衡日变化特征。而多云和雨天变化则不规则,降水天气除冬季外呈现多峰现象。各季节晴天、多云、降水天气短波辐射和净辐射均值依次减小,长波辐射各天气变化不大,净辐射均为正值。

春季不同天气(图5a)晴天各辐射通量变化趋势光滑,降水天气辐射通量变化最为剧烈,但峰值明显低于晴天和多云天气,晴天、多云和降水天气向下短波辐射最大值依次为1096.0 W·m⁻²、875.7 W·m⁻²、606.3 W·m⁻²,均值依次为359.1 W·m⁻²、250.7 W·m⁻²、137.8 W·m⁻²。同时不同天气下,向上短波辐射最大值依次为236.7 W·m⁻²、204.1 W·m⁻²、159.5 W·m⁻²,平均值依次为87.5 W·m⁻²、63.7 W·m⁻²、48.7 W·m⁻²。表明在晴天天气下,反照率最大,即地表含水量对反照率有着负反馈作用。净辐射最大值依次为651.3 W·m⁻²、581.5 W·m⁻²、319.5 W·m⁻²,平均值依次为150.8 W·m⁻²、113.1 W·m⁻²、44.6 W·m⁻²。由于晴天、多云、降水天气状况的变化,引起云量、气温等变化,长波向下辐射则有所增加,均值依次为200.7 W·m⁻²、241.1 W·m⁻²、269.1 W·m⁻²。

夏季晴天辐射通量变化曲线比其他季节更加平滑(图5b),在14:00前后向下短波辐射达到峰值1137.2 W·m⁻²,向上短波辐射和净辐射最大值分别为232.2 W·m⁻²、693.4 W·m⁻²,均为各季节晴天最大值,平均值则分别为403.3 W·m⁻²、90.5 W·m⁻²、188.7 W·m⁻²。多云天气短波辐射在白天呈双峰型,向下、向上短波辐射、净辐射最大值分别为1118.7 W·m⁻²、160.9 W·m⁻²、813.9 W·m⁻²,平均值为247.5 W·m⁻²、39.8 W·m⁻²、161.7 W·m⁻²。虽然多云天气某时刻辐射通量可能超过晴天,但当日平均值明显低于后者。本文所选日期降水主要集中在16:00以前,16:00—17:00时出现短暂放晴,向下短波辐射和净辐射急剧增加。降水期间短波辐射最小,前者16:00以前最大值仅为325.9 W·m⁻²,平均值为92.4 W·m⁻²。长波向上辐射受地表温度影响,晴天最大,降水天气最小,三种天气其辐射通量均值分别为371.4 W·m⁻²、361.5 W·m⁻²、329.6 W·m⁻²。

秋季晴天与其他季节变化趋势一致(图5c),向下、向上短波辐射、净辐射最大值分别为914.2 W·m⁻²、184.0 W·m⁻²、552.7 W·m⁻²,平均值则分别为274.3 W·m⁻²、65.0 W·m⁻²、110.8 W·m⁻²。多云天气下太阳升起后,辐射通量从11:00的732.86 W·m⁻²开始不再升高,甚至有所降低,16:00短暂达到峰值809.8 W·m⁻²,向下、向上短波辐射、净辐射均值分别为240.2 W·m⁻²、53.4 W·m⁻²、113.6 W·m⁻²。降水天气下向下短波辐射明显减小,均值仅有99.6 W·m⁻²。

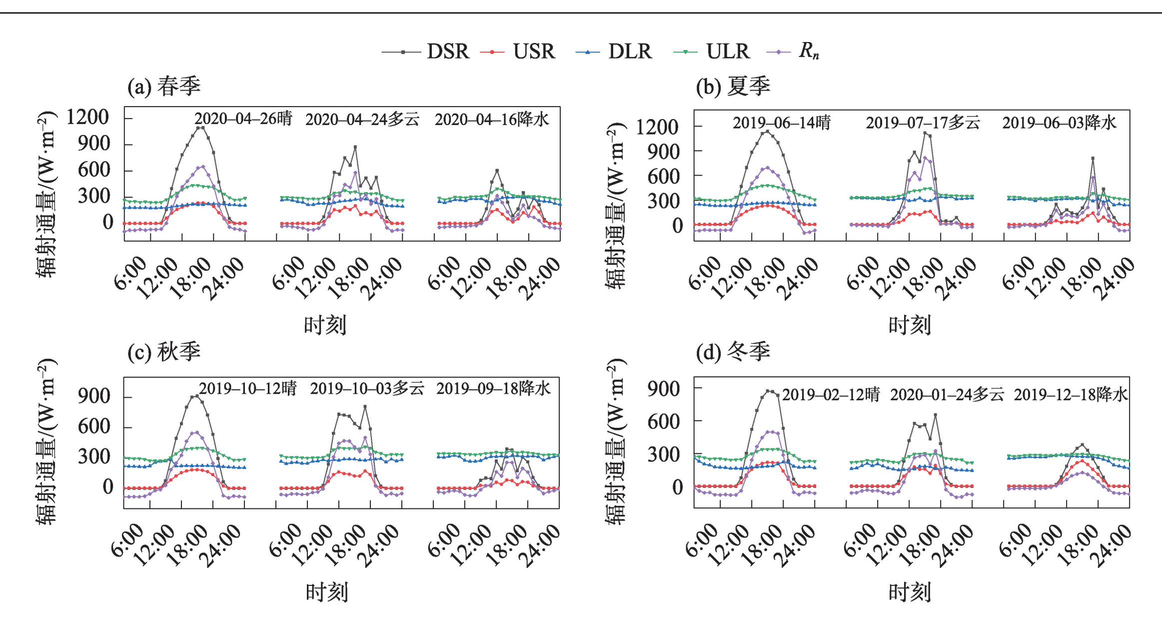


图5 申扎湿地典型天气背景下辐射分量的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of the components of radiation in four seasons in typical weather

向上短波辐射和净辐射均值则分别为22.8 W·m^{-2}、36.7 W·m^{-2}。

冬季所选日期晴天向下、向上短波辐射、净辐射最大值分别为870.0 W·m^{-2}、218.9 W·m^{-2}、495.2 W·m^{-2}，均值分别为241.3 W·m^{-2}、65.5 W·m^{-2}、86.2 W·m^{-2}（图5d）。多云天气向下、向上短波辐射、净辐射最大值分别为654.8 W·m^{-2}、188.9 W·m^{-2}、323.4 W·m^{-2}，均值则为164.14 W·m^{-2}、50.6 W·m^{-2}、30.5 W·m^{-2}。表明在降雪天气下，地表反照率急剧增加，改变了地表能量分配。2018年12月18日申扎湿地发生了降雪事件，虽然辐射通量变化也较平滑，但向下短波辐射相比晴天急剧减小，地表反照率高达0.61，向上、向下长波辐射变化幅度则较小。降雪天气向下、向上短波辐射、净辐射最大值为380.5 W·m^{-2}、232.0 W·m^{-2}、124.8 W·m^{-2}，均值分别为88.9 W·m^{-2}、55.3 W·m^{-2}、7.9 W·m^{-2}，各项辐射通量均值均为各天气各季节最小值。

2.4 地表反照率变化特征

地表反照率反映了下垫面对向下短波辐射的反射能力，为短波向上辐射与短波向下辐射之比，地表反照率与太阳高度角、大气透明程度、天气状况以及下垫面物理性质关系密切，其中下垫面物理性质包括植被颜色、密度、土壤湿度、粗糙度等，已有研究成果表明，土壤含水量与地表反照率成反比[26]。申扎湿地年内呈“U型”变化特征（图6），年平均反照

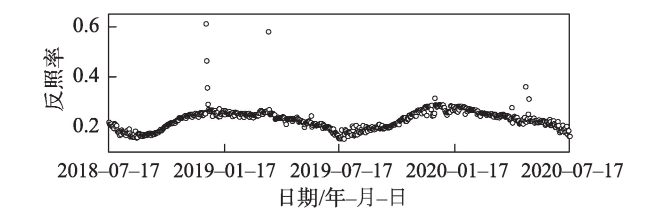


图6 申扎湿地反照率逐日变化

Fig. 6 Daily average variation of albedo in Xainza wetland

率为0.23，地表反照率季节特征变化明显：冬春季节太阳高度角小，气温下降，湿地植被枯萎，下垫面冻结，土壤含水量小，反照率大，且在2018年12月18日、2019年3月27日由于降雪事件的发生，出现两个峰值，反照率分别达到了0.62和0.63，而夏秋季节太阳高度角大，降水增加，气温升高，植被返青，下垫面融化，土壤含水量增加，反照率小，并在2019年7月17日达到了观测期间最小值，为0.16。由表1可知，11月地表开始冻结，反照率迅速增大，12月则由于积雪覆盖等影响，地表反照率最大为0.28。4月反照率下降明显，表明4月申扎湿地开始解冻，湿地含水量开始增加，与11月反照率大致相等。7—9月反照率为全年最低，表明到达了申扎雨季，10月以后降水减小，植被也开始枯萎，含水量降低，反照率增加到0.21。综上，申扎湿地地表反照率季节变化明显，雨季小，冻结期大，且在降雪天气下明显出现极值。

3 讨 论

近几十年来,在青藏高原整体气候"暖湿化"下,高寒湿地总体上却呈现退化趋势[19]。申扎地区湿地边缘出现宽窄不等的退化带,向荒漠化趋势发展[27],而地表蒸发量增大是青藏高原湿地变化的主要驱动力[28]。前人在青藏高原湿地的相关研究表明,太阳辐射在湿地地表蒸发中均发挥着重要作用[29-31],如在黄河源区湿地,太阳辐射对蒸发的影响占据绝对主导地位[30],太阳辐射通过直接作用影响地表蒸发,并且一般地,太阳辐射越大,蒸发量越大。与目前已有的青藏高原湿地辐射平衡观测结果相比,申扎湿地太阳辐射受到云量影响较大,辐射通量小于藏北高寒湿地[12]、长江源区湿地[13]等地区,因此,申扎湿地退化可能受到其他气候条件影响。同时与青藏高原其他下垫面辐射平衡特征对比发现[32],藏北高原地区不同高度高原草甸辐射特征也与申扎湿地有着显著不同,藏北高原太阳短波辐射主要受太阳高度角大小影响,而受大气透明度影响较小,而申扎湿地地区则受大气透明度影响大。故探索申扎高寒湿地辐射变化特征以及其他气候特征,在后续研究中将其与湿地地表蒸发量相联系,对分析申扎湿地退化原因有着重要科学意义。本研究首次分析了青藏高原中部地区申扎高寒湿地的不同时间尺度和不同天气下的地表辐射平衡以及地表反照率特征,虽然取得了一些成果,但仍存在局限性,如受限于观测资料限制,本研究未就湿地冻结与消融状态以及植被生长期与非生长期辐射特征进行对比,仅根据反照率变化粗略判断了申扎湿地冻结与消融的特征,后续研究中将通过增加观测5 cm地层温度详细分析。并且2 a的观测时间仍然较短,不能完全揭示湿地辐射的年际变化特征,未来还需持续加强观测。

4 结 论

本文基于申扎站波文比观测系统获得的2018-07—2020-07的辐射资料,分析了辐射平衡各分量和地表反照率的逐日变化和季节变化规律,主要结论如下:

(1) 申扎湿地观测期间年短波向下、向上辐射,长波向下、向上辐射,净辐射均值分别为226.9 W·m^{-2}、55.4 W·m^{-2}、241.9 W·m^{-2}、322.5 W·m^{-2}、90.9 W·m^{-2}。

(2) 向下短波辐射6月全年最大,1月最小。逐日变化具有明显的季节特征。春季辐射通量最大;辐射各分量均表现出夏季最大,春,秋季节次之,冬季最小的明显的季节变化特征。但振幅有明显区别:向下短波辐射振幅最大,向上、向下长波辐射次之,向上短波辐射振幅最小。

(3) 不同季节晴天各辐射分量变化曲线平滑,多云天气呈现多峰变化,降水天气辐射通量变化不规律,受天气影响最大。但长波辐射变化幅度均较小,向下短波辐射与净辐射变化趋势一致。

(4) 观测期间申扎湿地地表反照率平均值为0.23,1月平均值达到最大,7月则最小。在降雪等特殊天气下,反照率出现突变,最大值达到0.63,表明申扎湿地地表反照率对下垫面变化非常敏感。

参考文献(References):

[1] 姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 976-984. [Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and Indian monsoon on Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 976-984.]

[2] Wu G, Duan A, Liu Y, et al. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook[J]. National Science Review, 2015, 2(1):100-116.

[3] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280-294. [Wang Jiemin. Land surface process experiments and interaction study in China: From HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 280-294.]

[4] 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 344-351. [Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan Plateau: The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 344-351.]

[5] Ma Y, Kang S, Zhu L, et al. Tibetan observation and research platform: Atmosphere-land Interaction over a heterogeneous landscape [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(10): 1487-1492.

[6] 赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 833-860. [Zhao Ping, Li Yueqing, Guo Xueliang, et al. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scien-

tific Experiment[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(6): 833-860.]

[7] 姚檀栋. “第三极环境(TPE)”国际计划——应对区域未来环境生态重大挑战问题的国际计划[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 884-892. [Yao Tandong. TPE international program: A program for coping with major future environmental challenges of The Third Pole region [J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 884-892.]

[8] 姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示“亚洲水塔”的失衡及其各种潜在风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2761-2762. [YaoTandong. A comprehensive study of Water-Ecosystem-Human activities reveals unbalancing Asian Water Tower and accompanying potential risks[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2761-2762.]

[9] Ma N, Zhang Y, Guo Y, et al. Environmental and biophysical controls on the evapotranspiration over the highest alpine steppe[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 980-992.

[10] Gu S, Tang Y, Cui X, et al. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3-4): 175-185.

[11] 刘安花, 李英年, 张法伟, 等. 海北高寒湿地地气长、短波辐射的季节变化特征[J]. 草地学报, 2007, 12(3): 283-289. [Liu Anhua, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Seasonal variations of short wave and long wave radiation inlayer of soil and atmosphere of alpine wetland at north area of Qinghai [J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 12 (3): 283-289.]

[12] 何慧根, 胡泽勇, 荀学义, 等. 藏北高原湿地地表辐射的变化特征[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 561-567. [He Huigen, Hu Zeyong, Xun Xueyi, et al. The variation characteristics of radiation of the wetland surface in the northern Tibetan Plateau[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(5): 561-567.]

[13] 张海宏, 祁栋林, 苏文将. 长江源区高寒湿地辐射变化特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(31): 262-267. [Zhang Haihong, Qi Donglin, Su Wenjiang. Radiation change features at alpine wetland in source region of the Yangtze River[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(31): 262-267.]

[14] 殷代英, 屈建军, 余晔, 等.敦煌湖泊湿地生态系统地表辐射平衡特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 172-181. [Yin Daiying, Qu Jianjun, Yu Ye, et al. Variation of the components of radiation in desert wetland of Dunhuang, China [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 172-181.]

[15] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙. 青海湖流域瓦颜山湿地辐射平衡和地表反照率变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1216-1222. [Zhang Lele, Gao Liming, Chen Kelong. The variation characteristics of radiation balance and surface albedo in Wayanshan Wetland in the Qinghai Lake watershed[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1216-1222.]

[16] 谢琰, 文军, 刘蓉, 等. 黄河源区高寒湿地近地面辐射收支特征初步分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 1-10. [Xie Yan, Wen Jun, Liu Rong, et al. An Initial analysis of characteristics of radiation budget near ground in aLpine wetland in source area of the Yellow River[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(1): 1-10.]

[17] Guo Y, Zhang Y, Ma N, et al. Quantifying surface energy fluxes and evaporation over a significant expanding endorheic lake in the central Tibetan Plateau[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2016, 94(5): 453-465.

[18] 孙志高, 刘景双, 李彬. 中国湿地资源的现状、问题与可持续利用对策[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 83-88. [Sun Zhigao, Liu Jingshuang, Li Bin. The actuality, problems and sustainable utilization countermeasures of wetland resources in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 83-88.]

[19] 赵志龙, 张镱锂, 刘林山, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1218-1230. [Zhao Zhilong, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review[J]. Progress Geography, 2014, 33(9): 1218-1230.]

[20] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 等. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 856-862. [Liu Zhiwei, Li Shengnan, Wei Wei, et al. Research progress on alpine wetland changes and driving forces in Qinghai-Tibet Plateau during the last three decades[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 856-862.]

[21] 王小丹. 申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站[J]. 山地学报, 2014, 32(4): 505-508. [Wang Xiaodan. Xainza apine gassland and wtland eosystem oservation and eperiment sation[J]. Mountain Research, 2014, 32(4): 505-508.]

[22] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 652-662. [Wang Kunxin, Zhang Yinsheng, Zhang Teng, et al. Analysis of climate change in the Selin Co Basin, Tibetan Plateau, from 1979 to 2017 [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652-662.]

[23] 邹基玲, 季国良. 藏北高原太阳总辐射和地表反射率的分光特征[J]. 太阳能学报, 1996, 17(2): 2-6. [Zou Jiling, Ji Guoliang. The spectral characteristics of global radiation and surface albedo on northern Tibetan Plateau[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1996, 17(2): 2-6.]

[24] 武荣盛, 马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 251-259. [Wu Rongsheng, Ma Yaoming. Comparative analyses on radiation characteristics in different areas over the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 251-259.]

[25] 马宁, 王乃昂, 黄银洲, 等. 巴丹吉林沙漠腹地夏季不同天气条件下陆-湖面辐射收支与能量分配特征对比[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 796-809. [Ma Ning, Wang Nai'ang, Huang Yinzhou, et al. Characteristics of radiation budget and energy partitioning on land and lake surface under different summer weather conditions in the hinterland of Badain Jaran desert[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 796-809.]

[26] Wang K, Wang P, Liu J, et al. Variation of surface albedo and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau [J]. Boundary-Layer Meteorology,

2005, 116(1): 117-129.

[27] 李才, 翟庆国, 徐锋, 等. 藏北草地资源及其演化趋势——以申扎地区为例[J]. 地质通报, 2003, 22(增刊): 991-998. [Li Cai, Zhai Qingguo, Xu Feng, et al. Resources in grassland of northern Tibet and its evolutionary trend: A case study of the Zainza area [J]. Geological Bulietin of China, 2003, 22(Suppl.): 991-998.]

[28] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 等. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 856-862. [Liu Zhiwei, Li Shengnan, Wei Wei, et al. Research progress on alpine wetland changes and driving forces in Qinghai-Tibet Plateau during the last three decades[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 856-862.]

[29] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙. 青海湖流域瓦颜山湿地辐射平衡和地表反照率变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1216-1222. [Zhang Lele, Gao Liming, Chen Kelong. The variation characteristics of radiation balance and surface albedo in Wayanshan Wetland in the Qinghai Lake watershed[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1216-1222.]

[30] 陈金雷, 文军, 王欣, 等. 黄河源高寒湿地—大气间暖季水热交换特征及关键影响参数研究[J]. 大气科学, 2017, 41(2): 302-312. [Chen Jinlei, Wen Jun, Wang Xin, et al. The characteristics of water and heat exchange and its crucial influencing factors over alpine wetland during warm season in the source region of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41 (2): 302-312.]

[31] 李凤霞, 常国刚, 肖建设, 等. 黄河源区湿地变化与气候变化的关系研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 683-690. [Li Fengxia, Chang Guogang, Xiao Jianshe, et al. Relationship between wetlands changes and climate change in the Yellow River source region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 683-690.]

[32] 马伟强, 马耀明, 胡泽勇, 等. 藏北高原地面辐射收支的初步分析[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 348-352. [Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Hu Zeyong. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(3): 348-352.]

Characteristics of the radiation balance and surface albedo of a typical alpine wetland in Qiangtang Plateau

QIANG Yaohui[1,2], WANG Kunxin[1,2], MA Ning[3], ZHANG Yinsheng[1,4], GUO Yanhong[1],

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan)

Abstract: The energy exchange process and its effects on wetlands in the Qiangtang Plateau have an important impact on the local climate. This study is based on the radiation data observed from June 2017 to June 2020 in Xainza—a typical alpine wetland located in the Qiangtang Plateau—and comprehensively analyzes the characteristics of seasonal, monthly, daily, and hourly weather radiation and albedo. The results show that all the radiation components present obvious seasonal “U”-shaped patterns. The maximum downward shortwave radiation is 301.1 $W \cdot m^{-2}$, and, in June the maximum upward longwave radiation is 371.5 $W \cdot m^{-2}$, yet the minimum of both appeared in January. Downward shortwave radiation, upward and downward longwave radiation, and net radiation all show obvious seasonal patterns, characterized by “U”-shaped changes. The hourly value of shortwave radiation in each season is the highest in spring, followed by summer and autumn, and the lowest is detected in winter. Longwave radiation and net radiation are highest in summer and lowest in winter. The radiant flux on sunny days in each season is relatively smooth, and the changes in cloud cover and precipitation are irregular; the average yearly surface albedo is 0.23, the lowest detected in summer and the highest in winter, reaching up to 0.63 on snowy days. These results can contribute to revealing the dynamic changes of the radiation budget occurring on the typical alpine wetland of Xainza, in the Qiangtang Plateau, and to clarifying the influence of such variation on the thermal effect.

Keywords: Xainza wetland; radiation change; typical weather; albedo